

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу
Невского Сергея Андреевича «Физическая природа формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов на основе комбинированных неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния

Проблема управления свойствами металлических материалов под воздействием внешних полей различной природы продолжает играть важную роль в физике конденсированного состояния. Значительный интерес в этом плане представляют теоретические и экспериментальные исследования влияния плазменных потоков, электронных пучков, электрических полей и пластической деформации на различные материалы, приводящих к возбуждению пространственно-временных неустойчивостей и образованию микро- и наноструктур как в поверхностных слоях, так и в объеме твердого тела. Создание на этой основе новых наноструктурированных материалов с уникальными характеристиками представляет собой актуальную задачу современных нанотехнологий. В этой связи диссертационная работа Невского Сергея Андреевича, посвященная механизмам формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов при внешних энергетических воздействиях на основе комбинированных неустойчивостей, является актуальной. В данной работе вопросы формирования микро- и наноструктурных состояний твердых тел при воздействии концентрированных потоков энергии, электрических полей и интенсивной пластической деформации рассмотрены с единых позиций комбинированных сдвиговых неустойчивостей. При этом необходимо отметить, что автор в ходе выполнения диссертационной работы особое внимание уделил вопросам практического использования результатов.

Диссертация Невского С.А. состоит из введения, 6-ти глав, основных выводов, списка литературы из 346 наименований, приложения. Она изложена на 247 страницах машинописного текста, содержит 79 рисунков, 21 таблицу.

Во введении к диссертации приводится обоснование актуальности выбранной темы диссертации, определяется цель и задачи исследований. Описана научная новизна работы и ее практическая значимость, формулируются защищаемые положения. Приведена апробация работы на международных конференциях.

Первая глава диссертации является обзорной. В ней рассмотрены проблемы формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов при воздействии электрических полей, концентрированных потоков энергии (гетерогенные плазменные потоки, низкоэнергетические сильноточные электронные пучки), интенсивной пластической деформации длительной эксплуатации. Показано, что перспективными представлениями о формировании микро- и наноструктур при воздействии концентри-



рованных потоков энергии и длительной эксплуатации являются гидродинамические неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, Рэлея-Тейлора и термокапиллярная неустойчивость. Показано, что для изучения процесса локализации пластической деформации материалов в условиях импульсных электрических токов целесообразней рассматривать материал как двухфазную гетерогенную среду, состоящую из возбужденной фазы, которая отвечает за структурную перестройку системы и невозбужденной – не связанной со структурными превращениями.

Вторая глава посвящена методике диссертационного исследования. В ней изложен подход к решению задач поиска физической природы и механизмов формирования микро- и наноструктурных состояний при воздействии гетерогенных плазменных потоков и электронно-пучковой обработки, основанный на представлениях о возникновении различных видов неустойчивости. Особое внимание уделяется начальной стадии данных неустойчивостей. На этих стадиях формируются гармонические возмущения поверхности раздела «покрытие/подложка», «плазма/расплав», которые преобразуются в вихри, являющиеся предвестниками структурных состояний материалов различного размерного диапазона. Длина волны, при которой эти возмущения будут нарастать неограниченно, определяет размер получившихся структурных элементов. Анализ процесса локализации пластического течения материалов при деформировании с постоянной скоростью предлагается проводить, рассматривая материал как двухфазную гетерогенную среду. Первая фаза отвечает за структурные превращения, а вторая не связана с ними. Анализ дисперсионного уравнения позволил найти длину волны, при которой возможна неустойчивость пластического течения материалов.

В третьей главе приведены результаты исследования методами двухэкспозиционной спекл-интерферометрии влияния импульсного электрического тока на локализацию течения стали 08пс при активной пластической деформации. Установлено, что значения скорости очагов локализации без воздействия тока существенно ниже, чем при воздействии тока. Полученный результат диссертант интерпретирует исходя из представлений о материале как о двухфазной гетерогенной среде, изложенных в главе 2. В качестве первой фазы выбираются границы зерен, а в качестве второй – тело зерна.

Четвертая глава посвящена изучению влияния комбинированной электрофизической обработки, включающей воздействие гетерогенными плазменными потоками и последующее воздействие низкоэнергетическим высокоточным электронным пучком на структурно-фазовые состояния титановых и алюминиевых сплавов. Установлено, что основным механизмом формирования рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» является комбинация неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Найден диапазон значений горизонтальных составляющих скорости плазменного потока, при котором преобладающей становится неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. Показано, что проникновение легирующих элементов, на расстояние превышающее глубину проникновения по механизму диффузии, обусловлено возникновением и развитием данной неустойчивости. Влияние

последующей электронно-пучковой обработки на структуру титановых и алюминиевых сплавов изучалось в зоне оплавления и термического влияния. Показано, что образование структуры ячеистой кристаллизации титановых и алюминиевых сплавов, легированных иттрием в зоне оплавления, обусловлено комбинацией термо-, концентрационно-, испарительно-капиллярной и термоэлектрических неустойчивостей.

В пятой главе изучен процесс распада пластин цементита высокоуглеродистой перлитной стали при длительной эксплуатации на железной дороге. Установлено, что данный процесс обусловлен возникновением и развитием комбинированной неустойчивости Кельвина-Гельмгольца-Рэля-Тейлора. В первом приближении пластины цементита и феррита считались вязкими ньютоновскими жидкостями, причем эффекты, связанные с наличием вязкости, учитывались только на границе раздела сред. Во втором приближении учитывалась структурная релаксация вязкости по модели Максвелла. При анализе дисперсионного уравнения возмущений границе раздела сред также применялась зависимость вязкости от структурно-масштабного уровня.

В шестой главе приведены направления практического использования результатов диссертационного исследования. Показано, что основной проблемой внедрения плазменных энергетических воздействий для повышения эксплуатационных свойств является подбор оптимальных режимов обработки. Полученные результаты позволяют установить режимы обработки, обеспечивающие высокие механические свойства.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы.

В приложениях приведены акты и справки об использовании результатов диссертации в учебном процессе.

Научная новизна. В работе впервые с позиции единых представлений о возникновении комбинированных сдвиговых неустойчивостей материалов при внешних энергетических воздействиях изучено возникновение структур микро- и наноразмерного диапазона. Установлено, что образование рельефа поверхности раздела «покрытие/подложка» при воздействии гетерогенного плазменного потока и формирование микро- и наноструктур при распаде цементитной пластины рельсовой стали при длительной эксплуатации обусловлено неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца-Рэля-Тейлора. Показано, что при образовании структур ячеистой кристаллизации микро- и наноразмерного диапазона при воздействии электронно-пучковой обработки существенную роль играет комбинированная термо-, концентрационно-капиллярная и термоэлектрическая неустойчивость. Установлен диапазон значений напряженности термоэлектрического поля, при котором данная неустойчивость является значимой.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в расширении представлений о формировании нано и микроструктур при внешних энергетических воздействиях с позиций комбинированных сдвиговых неустойчивостей. Теоретическое исследование механизмов влияния концентрированных потоков энергии, электрических полей позволяют найти опти-

мальные режимы обработки материалов данными воздействиями. Результаты работы со значительным экономическим эффектом использованы в технологических циклах ремонтных предприятий горнодобывающей и металлургической промышленности.

Положения, вынесенные на защиту, и выводы диссертационной работы являются обоснованными и следуют из результатов работы. Их состоятельность проверена в ходе проведения научных исследований. Полученные данные согласованы с результатами других исследователей и не противоречат уже известным научным результатам.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обусловлена корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных экспериментальных и теоретических методов физики конденсированного состояния, применением методов математической статистики, сертифицированного программного обеспечения, согласием экспериментальных данных с данными математического моделирования, критическим сопоставлением с результатами других исследователей.

Апробация результатов работы и публикации. Результаты работы являются общепризнанными, хорошо известны специалистам, неоднократно докладывались на Российских и международных конференциях. Они представлены в 70 печатных работах, в том числе: в 15 статьях, включенных в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, 20 статьях в журналах, входящих в Перечень, рекомендованный ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 3-х монографиях, остальные - в трудах всероссийских и международных конференций и других научных мероприятий. Получен 1 патент на изобретение.

Диссертация Невского С.А. не свободна от недостатков, которые заключаются в следующем:

1. Термин «градиентные состояния» использован в названии, цели работы, и один раз в главе 5 применительно к рельсовой стали и ее интенсивной пластической деформации. Поскольку он не применялся к другим материалам и воздействиям, то название работы не корректно и не является общим.
2. Отсутствие общности обнаруживается и в методическом подходе к исследованию – для каждого из четырех материалов изучался свой, один из четырех, методов внешнего воздействия. Т.е. рассматривались частные случаи, что не позволяет сделать универсальный вывод о едином физическом механизме воздействия во всех материалах. Это лишь иллюстрация отдельных, не связанных явлений!
3. Обоснование выбора и описание структурно-фазового состояния столь разных материалов (рельсовая сталь, малоуглеродистая сталь, сплавы Ti-Y и Al-Si) отсутствует. Чем связаны исследуемые материалы? Почему не учитывалась структура исходного состояния?
4. В названиях глав, разделов и в тексте идет смешение понятий электрическое поле и электрический ток, что негативно сказывается на восприятии смысла.

5. В работе рассматриваются неустойчивости, возникающие на границах жидких сред (стр.16) или границах «плазма -газ» (стр.72). При этом для жидкостей рассматриваются плоские поверхности раздела и электрические поля (но не ток!). Однако не поясняется, какие есть основания для переноса подобных представлений на твердые тела (кроме существования внутренних межфазных границ раздела).

6. Применение в гл. 2 и 3 двухфазной модели для объяснения очагов локализации смещений и «ударных переходов» малоэффективно, так как:

-например, в крупнозернистой стали 08пс, где объемная доля границ зерен (возбужденной фазы) составляет <1%, ЭПЭ хорошо наблюдаемый;

-в наноструктурных материалах, где объемная доля ГЗ более существенна, ЭПЭ практически не наблюдается из-за отсутствия свободных дислокаций;

7. На странице 101 – утверждается, что различие температур тела зерна и границ зерен облегчает проскальзывание зерен по границам. Это противоречит результатам исследования сверхпластичности, которая не наблюдается для крупнозернистых материалов. Там же неожиданно появляются электрические поля (хотя изучается влияние тока), ранее отсутствующие.

8. Раздел 6.3, описывающий применение математическое моделирование абразивного износа композиционных покрытий, полученных методом электродуговой наплавки, не является логическим следствием полученных результатов, поскольку абразивный износ, как метод воздействия, не рассматривался.

9. Выводы к главе 3 не учитывают другие возможные механизмы (кроме теплового) и наличия шейкообразования (многократного увеличения истинной плотности тока).

Рис.3.2:

-из каких соображений выбран режим импульсной токовой обработки ($j=3500 \text{ A}/20=175 \text{ A}/\text{мм}^2$, $Q=1000$), почему не меньше или больше?

Рис.3.5 – следовало бы привести физическое объяснение перегрева вертикальных границ зерен

Перечисленные замечания не снижают ценность полученных результатов диссертационной работы и показывают сложность взаимодействия внешних полей с веществом.

Заключение. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния (п. 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления», п. 7 «Технические и технологические приложения физики конденсированного состояния») и пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней. Она является научно-квалификационной работой, в которой на ос-

новании полученных автором результатов решена задача установления физической природы и механизмов формирования градиентных структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов на основе комбинированных неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях, имеющая важное хозяйственное значение. Автореферат и основные публикации полностью отражают содержание диссертации.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что автор диссертации, Невский Сергей Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Даю свое согласие на включение моих персональных данных в аттестационное дело С.А. Невского и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Доктор технических наук (специальность 05.16.01 – металловедение и термическая обработка металлов и сплавов), профессор, главный научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Адрес: 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4.

Телефон: +7(495) 6234237

E-mail: vlstol@mail.ru

Столяров
Владимир Владимирович

Дата подписания отзыва «11» апреля 2022 г.

Подпись Столярова В.В. удостоверяю
Ученый секретарь Ученого совета ИМАШ РАН

